



## アクション宇宙論とその実験への示唆

著者	月花 竜次
号	84
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3189号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00125437">http://hdl.handle.net/10097/00125437</a>

論文内容要旨

(NO. 1)

氏 名	月花 竜次	提出年	平成 30 年
学位論文の 題 目	アクシオン宇宙論とその実験への示唆		

論文目次

第1章 序論

第2章 アクシオン

第3章 アクシオン宇宙論

第4章 アクシオンランドスケープにおける暗黒物質

第5章 ALP によるインフラトンと暗黒物質の統一

第6章 隠れた光子を用いた大統一理論と QCD アクシオン

第7章 結論

付録 A 非可換ゲージ理論の  $\theta$  真空

付録 B 2ループのくりこみ群方程式

論文内容要旨

暗黒物質の存在は銀河の回転曲線や重力レンズ効果、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）などの観測により確かめられており、標準理論を超える物理の明確な証拠の一つである。その最も非自明な性質として、宇宙年齢のおよそ10倍以上の寿命を持つことが挙げられる。

これまで数多くの暗黒物質モデルが提案されてきたが、有力な暗黒物質候補の一つにアクシオンがある。アクシオンは摂動論的には質量を持たないが、非摂動効果によって小さな質量を獲得する。したがって、アクシオン暗黒物質は近似的シフト対称性の観点から自然に長寿命になる。アクシオンの代表例として、strong CP問題を解決するために導入されたQCDアクシオンが挙げられる。QCDアクシオンはQCDの非摂動効果からポテンシャルを獲得し、初期振幅に微調整がなければ崩壊定数が  $f_a \simeq 10^{11} - 10^{12}$  GeVのときに暗黒物質の存在量を説明できる。また、他のアクシオンの例としてストリングアクシオンが挙げられる。超弦理論においては、余剰次元のコンパクト化に伴い、数多くのストリングアクシオンが現れることが知られている。典型的な崩壊定数の大きさは  $f_a \sim 10^{16} - 10^{17}$  GeVで与えられ、初期値に微調整がないとすると質量が  $m_a \sim 10^{-22} - 10^{-17}$  eVのときに暗黒物質の存在量を説明できる。

アクシオンは暗黒物質だけでなく、strong CP問題や超弦理論、インフレーションと関連する重要な粒子であり、様々な探索実験が行われてきた。アクシオン探索実験ではアクシオン-光子結合 $g_{a\gamma\gamma}$ が重要な役割を果たしており、太陽アクシオン探索実験であるCAST実験から  $g_{a\gamma\gamma} \lesssim 0.66 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$  と

いう上限が得られている。また、アクシオン暗黒物質探索実験であるADMXは  $1.9 \text{ } \mu\text{eV} \lesssim m_a \lesssim 3.65 \text{ } \mu\text{eV}$ の範囲のQCDアクシオンを排除しつつある。現在も世界中でアクシオン探索実験が進行ないし計画中であり、次世代太陽アクシオン探索実験IAXOや、次世代アクシオン暗黒物質探索実験(ADMX, CULTASK, MADMAX, ABRACADABRAなど)によってアクシオンを検出または制限できると期待される。

本博士論文では、3つの研究を通して様々なアクシオン暗黒物質模型とその拡張を提案し、その実験への示唆について考察した。1つ目の研究では、数多くのストリングアクシオンによって形成されるアクシオンランドスケープの枠組みにおいて、暗黒物質の研究を行った[1]。特に2つ(以上)のポテンシャルの相殺により軽い質量が実現される場合に、アクシオンの残存量や等曲率ゆらぎが著しく抑制されることを発見した。その結果、従来のストリングアクシオン暗黒物質 ( $m_a \sim 10^{-22} - 10^{-17} \text{ eV}$ ) より遥かに重い質量領域 ( $m_a \sim 100 \text{ MeV}$ ) が可能であることを示した。今回の模型におけるアクシオンはMeV程度の質量を持つため、その崩壊を通じMeVスケールのガンマ線の観測によって検証できる。この領域のガンマ線の観測は長らくアップデートされていないため、その重要性を動機づける結果となった。

2つ目の研究では、アクシオンによるインフラトンと暗黒物質の統一模型に関する研究を行った[2,3]。ナチュラリインフレーションを拡張した模型について解析を行い、インフレーションにおいてCMBゆらぎを説明するために必要な質量と崩壊定数の関係式を発見した。その後、効率的な再加熱を行う条件を明らかにし、再加熱で蒸発し切らずに残ったアクシオンが暗黒物質を説明する条件を導いた。興味深いことに3つの条件(インフレーション、再加熱、暗黒物質の存在量)を全て説明できる領域が存在しており、それは  $0.01 \text{ eV} \lesssim m_a \lesssim 1 \text{ eV}$ で与えられることを示した。以上の研究によって、インフレーションから現在の宇宙に至るまでの無矛盾なシナリオを提案することができた。また、今回のシナリオがIAXO実験やCMB観測、バリオン音響振動の観測によって検証可能であることもわかった。

3つ目の研究では、隠れた光子を導入した新しい大統一理論模型の提案と、その模型へのQCDアクシオン暗黒物質の導入について研究を行った[4,5]。大統一理論は有力な標準理論を超える物理として考えられているが、ミニマルSU(5)大統一理論は結合定数の統一が実現できないという理由と陽子崩壊探索の制限に抵触するという理由によって既に棄却されている。そこで過去の文献において、隠れた光子と標準理論の光子の運動項混合によって $g_Y$ の規格化が変わり、結合定数の統一を実現できる可能性が指摘された。しかし、運動項混合はSU(5)対称性によって禁止されるため、そもそもどのようにして混合項が生成されるかという問題が存在していた。

本研究の前半部分ではSU(5)  $\times$  U(1)<sub>H</sub>に基づいた大統一理論の模型を提案し、運動項混合の生成条件を明らかにした[4]。模型の解析では2ループレベルでくりこみ群方程式を解き、結合定数の統一に必要な混合の大きさ  $\chi(M_Z) \simeq 0.37$ と統一スケールの大きさ  $M_G \simeq 10^{16.5} \text{ GeV}$ を精度よく決定した。さらに、U(1)<sub>H</sub>の電荷を持つ物質場を導入してもこれらの結果が変わらないことを示した。また、比較的大

きな運動項混合  $\chi = \mathcal{O}(0.1)$  を生成するために、大きな  $U(1)_H$  の結合定数が必要となることを明らかに  
(NO. 3)

した。後半部分では、構築したモデルの暗黒物質候補として、QCD アクシオンを無矛盾に導入できることを明らかにした[5]。今回のモデルでは隠れた光子が存在するため、アクシオン-光子結合が変更される。特に結合定数の統一を考えると、大きな運動項混合  $\chi = \mathcal{O}(0.1)$  と  $U(1)_H$  が強結合であることが要請され、その結果として PQ フェルミオンがアクシオン-光子結合  $g_{a\gamma\gamma}$  に大きな寄与をもたらすことを明らかにした。定量的には、 $U(1)_H$  を導入しない場合と比べて  $g_{a\gamma\gamma}$  がおよそ 10-100 倍程度になることを発見した。以上の研究によって、strong CP 問題と暗黒物質の問題を解決できる  $SU(5)$  大統一理論モデルの構築に成功した。そして、結合定数の統一条件からアクシオン-光子結合  $g_{a\gamma\gamma}$  が通常より大きくなるため、広い質量領域に渡って QCD アクシオンの検証が可能であることがわかった。

本博士論文では超弦理論とインフレーション、大統一理論の観点からアクシオン暗黒物質モデルとその拡張について研究を行った。いずれの研究においても、従来とは質的に異なる結果が得られ、アクシオン探索実験に対して重要な示唆を与えることができた。

[1] R.Daido, T.Kobayashi and F.Takahashi, Phys.Lett. B765 (2017) 293-299.

[2] R.Daido, F.Takahashi and W.Yin, JCAP 1705 (2017) no.05, 044.

[3] R.Daido, F.Takahashi and W.Yin, JHEP 1802 (2018) 104.

[4] R.Daido, F.Takahashi and N.Yokozaki, Phys.Lett. B768 (2017) 30-37.

[5] R.Daido, F.Takahashi and N.Yokozaki, Phys.Lett. B780 (2018) 538-542.

## 別 紙

### 論文審査の結果の要旨

月花氏は「アクシオン宇宙論とその実験への示唆」というタイトルの博士論文において、以下に記述する通り、彼自身がこれまでにあげた優れた研究成果を詳細かつ分かりやすく説明することに成功している。従来、アクシオンに関して暗黒物質や暗黒エネルギー、インフレーションといった様々な観点からその宇宙論的影響が考察されてきた。月花氏の博士論文の趣旨はそれらを網羅的に概観することではなく、むしろ過去の文献の中で見過ごされてきた新しいアクシオンの宇宙論的シナリオを発見・構築し、その宇宙論的および観測的含意について調べることによって、アクシオンが果たす宇宙論的可能性の範囲を広げることにある。具体的には、アクシオンがダークマター、インフレーション、および大統一理論の枠組みにおいて果たす3つの新たなシナリオについて研究を行っている。最初のシナリオにおいてはアクシオンがflat-bottomedタイプのポテンシャルを持った場合の宇宙論的進化を検証し、その存在量および等曲率ゆらぎが著しく抑制されることを明らかにした。2つ目のシナリオにおいては、あるクラスのアクシオンを用いたインフレーションモデルにおいてインフレーション中のダイナミクスがポテンシャル最小値付近のアクシオンの性質と密接に関連する可能性があることを発見した。これにより、インフレーションとダークマターを同時に説明するのみならず、インフレーションと再加熱が生じる条件からダークマターとして許されるパラメータ領域を絞り込むことに成功した。最後のシナリオにおいては、隠れたU(1)ゲージ対称性を導入することで標準理論に存在する3つの力の統一するという新しい大統一理論の構築である。この統一理論において中心的な役割を果たすのがhyperchargeとhidden U(1)との中の運動項混合であるが、その起源を詳細に議論し、さらにアクシオンダークマターを結合定数の統一と無矛盾に導入することができることを明らかにした。特にアクシオンと光子の間の結合が通常よりも10-100倍程度大きくなるため、この新たな大統一理論モデルの検証可能性が高いことは注目に値する。以上の研究成果は、月花氏が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、本博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。